



Scientia Agropecuaria

Sitio en internet: www.sci-agropecu.unitru.edu.peFacultad de Ciencias
AgropecuariasUniversidad Nacional de
Trujillo

Optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de colza silvestre (*Brassica Campestris*)

Process optimization of biodiesel production from wild rapeseed (*Brassica campestris*)

Héctor Ramírez¹, Hubert Arteaga^{2,*}, Raúl Siche²¹Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible. Calle Collagate 518, Urb. Maranga, San Miguel, Lima, Perú.²Departamento de Ciencias Agroindustriales (Universidad Nacional de Trujillo) Avda. Juan Pablo II s/n Trujillo Perú.

Recibido 09 junio 2011; aceptado 09 marzo 2012

Resumen

Los objetivos de esta investigación fueron, optimizar el rendimiento de biodiesel a partir del aceite de colza silvestre en función de la relación molar metanol/aceite, la concentración de catalizadores homogéneos NaOH y KOH, temperatura y tiempo de transesterificación a través de la metodología de superficie respuesta, y determinar las características fisicoquímicas del biodiesel obtenido en condiciones optimizadas. Fue aplicado un diseño de Plackett y Burman (PB12) para la etapa de screening y un diseño compuesto central rotacional (DCCR) para la optimización final. Las condiciones que maximizan el rendimiento de biodiesel (77.8 %) se obtuvieron a concentraciones de 0 – 0.2 % de NaOH y de 0.4 a 0.6 % de KOH, con tiempos de 77 a 81 minutos, manteniendo constante la relación molar metanol/aceite en 6/1 y una temperatura de 60°C. Las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido en condiciones optimizadas cumplen con las especificaciones técnicas dadas por la ASTM D6751 – 07 y EN14214.

Palabras clave: Diseños experimentales, Transesterificación, metanolisis, Plackett y Burman.

Abstract

The objectives of this study were, to optimize the performance of biodiesel from rapeseed wild oil depending on the molar ratio methanol / oil, the concentration of NaOH and KOH homogeneous catalysts, temperature and time of transesterification through the response surface methodology, and determining the physicochemical characteristics of biodiesel obtained under optimized conditions. A Plackett and Burman (PB12) design was applied for the screening stage and a rotatable central composite design (DCCR) for the final optimization. The conditions that maximize the yield of biodiesel (77.8%) were obtained at concentrations of 0 to 0.2% NaOH and 0.4 to 0.6% KOH, with time from 77 to 81 minutes, keeping constant the molar ratio of methanol/oil in 6/1 and a temperature of 60 °C. The physicochemical properties of biodiesel obtained under optimized conditions meet the technical specifications given by ASTM D6751 - 07 and EN14214.

Keywords: Experimental design, Transesterification, methanolysis, Plackett and Burman.

1. Introducción

El consumo de combustibles fósiles, entre ellos el petróleo, el carbón y el gas natural, da lugar a emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al cambio climático y cuyas repercusiones incluyen: la elevación del nivel del mar, la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas, la extinción de diversas especies, el agravamiento de las sequías y las malas cosechas. En el

mediano plazo todo esto nos afectará, por lo que los países deben dirigir acciones encaminadas al desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia energética, como podría ser el uso de energías alternativas y renovables, entre ellas la producción de biodiesel. También se deben establecer políticas para la reducción de emisiones, promoviendo el desarrollo sustentable en la agricultura y tomando

* Autor para correspondencia

Email: harteaga@unitru.edu.pe (H. Arteaga)

acciones de reforestación (Villarraga, 2007).

El biodiesel es un combustible que puede remplazar total o parcialmente a los de origen fósil en motores diesel con rendimientos comparables a estos últimos pero, con una contribución favorable al medio ambiente; además, se origina de materia prima renovable, su combustión en motores diesel no contribuye al incremento del CO₂, no se produce SO₂ y la combustión es más completa (Frangrui *et al.*, 1999).

Por otro lado, el rendimiento y las propiedades fisicoquímicas del Biodiesel varían según la materia prima a partir de la cual se lo obtuvo (Blangino y Romano, 2004). Avelar (2008) agrega a las variables que intervienen en la reacción de transesterificación, tales como la temperatura de reacción, el tipo y la cantidad de catalizador utilizado, a la relación alcohol / aceite vegetal, la velocidad de agitación y el tiempo de reacción, entre otros. Variables que podrían ser utilizadas para un estudio de optimización.

En el Perú la producción de biocombustibles se viene fomentando desde que se aprobó la Ley N° 28054 en el 2003 que promueve el mercado de los biocombustibles y su reglamento, siendo los cultivos que han despertado mayor interés la palma aceitera, la colza o canola, el algodón, el piñón y la higuera o ricino.

La colza silvestre o Ñabo, que abunda en la ciudad de Tayabamba, provincia de Patate, Departamento de la Libertad, es una semilla nativa, que a pesar de sus bondades, no es aprovechada adecuadamente. La colza silvestre es considerada una maleza, factor que le da una ventaja adicional ya que no afectaría la seguridad alimentaria, como en el caso de los alimentos, criterio considerado para la producción de biodiesel de primera generación (Suarez *et al.*, 2009).

Por todo ello, este trabajo tuvo como objetivo, optimizar el rendimiento de biodiesel a partir del aceite de colza

silvestre, una semilla nativa con amplia potencialidad para la producción de biodiesel.

2. Materiales y métodos

2.1. Obtención del biodiesel

Se utilizaron semillas de colza silvestre provenientes de la Ciudad de Tayabamba previamente seleccionadas. Las semillas se sometieron a un proceso de extracción de aceite por prensado en frío, el cual fue filtrado usando papel filtro Wattman N° 2 y secado en estufa a 104°C. Así quedó listo para la reacción de transesterificación. En este proceso, en una primera etapa se utilizó el diseño de Plackett y Burman (PB) para evaluar los efectos en la primera etapa. El diseño compuesto central rotacional (DCCR) fue utilizado en una segunda etapa para la optimización final del rendimiento de biodiesel, la viscosidad cinemática y el índice de cetano en función de la relación molar metanol/aceite, la concentración de catalizadores homogéneos NaOH y KOH, temperatura y tiempo de transesterificación. Los niveles de las variables independientes utilizados en cada diseño experimental se muestran en la Tabla 1.

La reacción de transesterificación se llevó a cabo en un reactor enchaquetado termostático con agitación constante en 800 rpm (Figura 1), considerando 250 ml de aceite de colza como base y las correspondientes cantidades de metanol, NaOH y KOH según los niveles de cada ensayo; la mezcla reaccionante se dejó decantar para la separación del biodiesel de la glicerina por un lapso de 24 h para luego lavar el biodiesel en tres oportunidades. Finalmente se sometió a un secado en estufa a 104°C, hasta una humedad inferior a 0.05% de agua.

El rendimiento de biodiesel se determinó utilizando la siguiente relación:

$$R(\%) = \frac{\text{peso biodiesel puro}}{\text{peso del aceite de colza} + \text{peso de aditivos}} \times 100$$

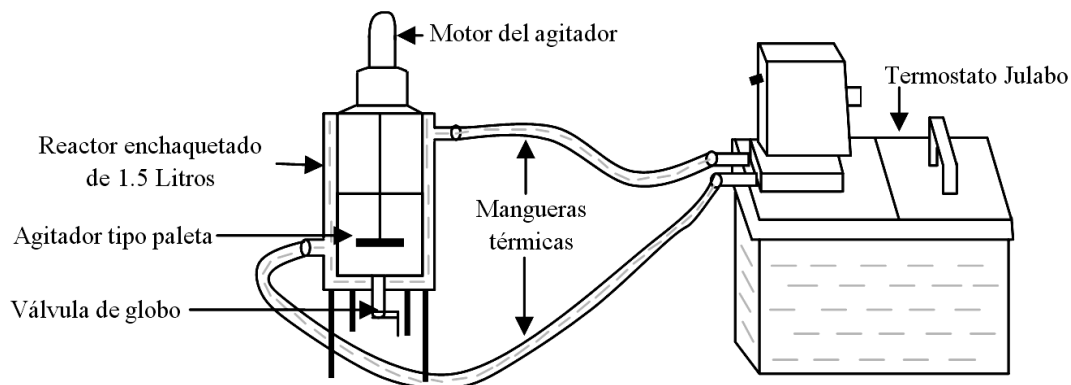


Figura 1. Reactor usado en la reacción de transesterificación.

Tabla 1

Niveles de las variables independientes en cada diseño experimental; Plackett y Burman (PB) y Diseño compuesto central rotacional (DCCR).

VI	PB ^a			DCCR ^b				
	-1	0	+1	-1.68	-1	0	1	1.68
X ₁	3:1	6:1	9:1	Constante: 6:1				
X ₂	0	0.5	1	0	0.2	0.5	0.8	1
X ₃	0	0.5	1	0	0.2	0.5	0.8	1
X ₄	30	60	90	Constante: 60°C				
X ₅	50	90	130	50	66.2	90	113.8	130

VI: Variables Independientes

X₁: Relación molar metanol/aceite

X₂: Concentración NaOH (%)

X₃: Concentración KOH (%)

X₄: Temperatura (°C)

X₅: Tiempo (min).

^a Se utilizó un PB12 + 3 repeticiones en el punto central, totalizando 15 unidades experimentales

^b Se utilizó un DCCR 2³ + 6 axiales + 3 repeticiones en el punto central, totalizando 17 unidades experimentales.

2.1. Análisis Físicoquímicos

En el aceite se determinó el índice de acidez (NTP 209.005:1968, revisada el 2011), viscosidad cinemática (ASTM D445), índice de yodo (NTP 209.008:1968), índice de peróxido (NTP 209.006:1968, revisada el 2011) y triglicéridos (cromatografía de gases). Los primeros cuatro se realizaron en el Laboratorio de Química - Física de la Universidad Nacional de Trujillo, mientras que el último se llevó a cabo en el Laboratorio 21 de Investigación y Química aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería. En el biodiesel se determinó el

rendimiento (método gravimétrico), viscosidad cinemática (ASTM D445), poder calórico (método sugerido por Parr Instrument Company Inc), índice de cetano (ASTM D613), índice de acidez (ASTM D664), punto de inflamación (ASTM D93), porcentaje de cenizas (ASTM D874), agua y sedimentos (ASTM D2709), carbón conradson (ASTM D4530) y glicerina libre y total (ASTM D6584)

2.2. Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de efectos por el diagrama de pareto para la primera etapa (Screening) y un análisis de regresión, análisis de varianza de la regresión, desvíos relativos y superficies de respuesta para la segunda etapa (Optimización).

3. Resultados y discusión

3.1. Características físicoquímicas del aceite de colza silvestre

La Tabla 2 muestra las características físicoquímicas del aceite de colza silvestre; la acidez presentó un valor de 0.23 mg KOH/g de aceite, siendo mucho menor al valor recomendado por Araujo (2006) quien afirma que este debe ser menor a 2mg KOH/g de aceite; si este valor fuese elevado provocaría la formación de jabón en la transesterificación y que si persiste en el biodiesel afectaría en la corrosión de metales, pérdida de potencia, aumento de emisión de humos y parada total del motor (Ribeiro, 2007). La viscosidad cinemática

fue de 56.3 mm²/s, valor cercano a 59 mm²/s (Ribeiro, 2007). Esta propiedad aumenta con la longitud de la cadena de ácidos grasos y disminuye con el aumento del número de insaturaciones (Magalhães *et al.*, 2009). Para el índice de yodo Ribeiro (2007) reporta un rango entre 94 y 120 y precisa que es un factor muy importante ya que está relacionado con el índice de cetano, que se relaciona con la calidad de la combustión en el motor (Castro *et al.*, 2007).

Tabla 2

Características fisicoquímicas del aceite de colza silvestre.

Característica	Valor	Unidades
Acidez	0.16	%
Índice de acidez	0.23	mg KOH/g
Viscosidad cinemática	56.3	mm ² /s
Índice de yodo	101	
Índice de peróxido	4	mEq.O ₂ /kg.
Ácido Palmítico	3.8	%
Ácido Esteárico	1.6	%
Ácido Araquídico	0.2	%
Ácido Palmitoleico	3.8	%
Ácido Oleico	54.8	%
Ácido Linoleico	22.2	%
Ácido Linolénico	9.8	%
Ácido Erúico	< 0.1	ppm

El índice de peróxido obtenido fue de 4 mEq O₂/kg indicando una baja degradación oxidativa (Magalhães *et al.*, 2009) y cumpliendo con lo que recomienda la Norma Codex STAN 210-1999 (hasta 15 mEq O₂/kg); sin embargo como está relacionado con las insaturaciones en los ácidos grasos, y teniendo en cuenta que el aceite de colza silvestre presentó concentraciones de 54.8, 22.2 y 9.8% para el ácido oleico, linoléico y linolénico respectivamente hace suponer que esta propenso a la oxidación (Lawson, 1994). En tanto los ácidos grasos saturados como el palmítico (3.8%), esteárico (1.6%), arquídico (0.2%), presentan porcentajes poco considerables y el ácido erúico es insignificante indicando la no toxicidad del aceite, datos que son similares a los reportados por Calvo (2008).

3.2. Optimización del rendimiento

Screening

En la Tabla 3 se muestra los resultados del rendimiento, viscosidad cinemática e índice de cetano para el diseño de PB.

Tabla 3

Rendimiento, viscosidad cinemática e índice de cetano del biodiesel para el diseño de PB.

Ensayo	Relación Molar M/A	NaOH (%)	KOH (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Viscosidad Cinemática (mm ² /s)	Índice de Cetano
1	9/1	0	1	30	50	68.61	2.081	53.355
2	9/1	1	0	90	50	NHR	ND	ND
3	3/1	1	1	30	130	NHR	ND	ND
4	9/1	0	1	90	50	48.09	5.644	53.789
5	9/1	1	0	90	130	NHR	ND	ND
6	9/1	1	1	30	130	NHR	ND	ND
7	3/1	1	1	90	50	NHR	ND	ND
8	3/1	0	1	90	130	82.18	5.756	48.733
9	3/1	0	0	90	130	NHR	ND	ND
10	9/1	0	0	30	130	NHR	ND	ND
11	3/1	1	0	30	50	80.72	5.189	47.354
12	3/1	0	0	30	50	NHR	ND	ND
13	6/1	0.5	0.5	60	90	78.00	2.293	59.092
14	6/1	0.5	0.5	60	90	78.67	5.097	54.925
15	6/1	0.5	0.5	60	90	79.33	4.405	46.739

M/A: Metanol/Aceite; NHR: No hubo reacción; ND: No determinado por la no reacción.

Nazario (2005) establece que un buen rendimiento se considera sobre el 76%, siendo los ensayos 8, 11, 13, 14 y 15 los que cumplen con este criterio, los demás están por debajo e incluso en algunos ensayos no se obtuvo biodiesel. La no obtención de biodiesel se explica por la no existencia de la reacción de transesterificación, situación que se presentó en tres situaciones: (a) cuando la relación molar es alta (9/1) y la concentración de NaOH está al 1%, (b) cuando participan tanto el NaOH como el KOH en concentración del 1%, respectivamente, independientemente de la relación molar, y (c) cuando no hay participación de los catalizadores (ni NaOH, ni KOH). La norma ASTM establece que de 1.9 a 6 mm²/s es el rango para la viscosidad cinemática y un valor mínimo de 47 para el índice de cetano, que se cumplen en todos los ensayos en los que se obtuvo biodiesel. El ensayo 8 es el que presenta el mayor rendimiento y cumple con las normas ASTM sin embargo requiere el mayor tiempo de transesterificación lo que hace costoso el proceso y puede presentar el inconveniente de una posible inversión de la reacción originada por el agotamiento de alguno de los reactantes (Nazario, 2005).

La figura 02 evidencia que todas las variables independientes fueron significativas para el rendimiento. No pasó lo

mismo para la viscosidad cinemática, en la que ninguna tiene efecto significativo. Para el índice de cetano sólo fueron significativas las concentraciones de NaOH y KOH, así como el tiempo de transesterificación, que coincidentemente son las que presentan mayor significancia en el rendimiento. Por este motivo se les consideró en la optimización final pero con nuevos niveles, en tanto la relación molar y la temperatura permanecieron constantes en 6/1 y 60°C, respectivamente. Lima *et al.* (2010) encontró también que la concentración de catalizador es la variable que más afecta el rendimiento, seguido por la relación molar metanol/aceite, tipo de catalizador, agitación, tiempo y temperatura. La concentración presenta un efecto negativo al pasar de 0.5 a 1.5%, el incremento de la relación molar desfavorece el rendimiento por la formación de emulsión en el medio.

En cuanto al tipo de catalizador se encontraron diferencias significativas entre el NaOH y KOH, obteniéndose mayor rendimiento con este último. La agitación mejoró la dinámica de difusión por la colisión de las especies reactivas en el medio siendo el tiempo de equilibrio de la reacción de 60 minutos y dado que la reacción de transesterificación es endotérmica, el aumentar la temperatura tiene un efecto positivo en el rendimiento.

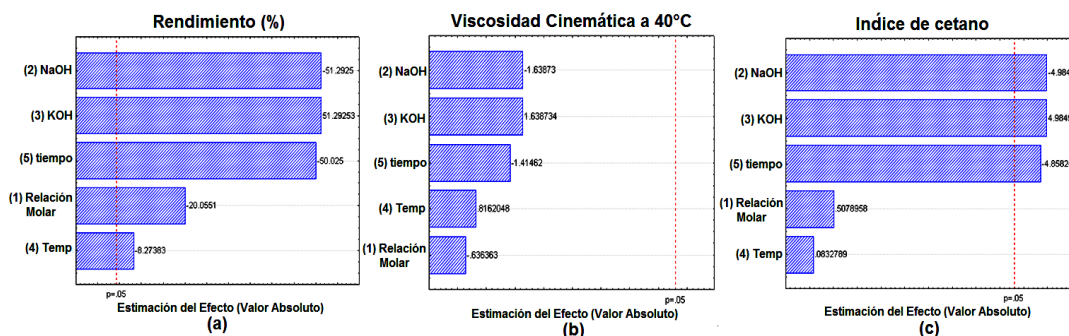


Figura 2. Diagrama de Pareto de los efectos de la relación molar metanol/aceite, concentración de NaOH y KOH, temperatura y tiempo de transesterificación en el (a) rendimiento, (b) la viscosidad cinemática a 40°C, y (c) el índice de cetano.

Magalhães *et al.* (2009) encontró tiempos muy cortos de reacción de transesterificación que no superan los 30 segundos al utilizar como fuente de calor radiación microondas que aunado a la excelente capacidad del metanol para absorberlas, hace que el proceso sea más rápido, evitando así tiempos tan largos como los usados en este trabajo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta los costos energéticos.

Optimización final

La Tabla 4 muestra los resultados de rendimiento, viscosidad cinemática e índice de cetano obtenidos según el diseño compuesto central rotacional. Se observa que no se obtuvo biodiesel en los ensayos 6 y 10 (0% de rendimiento) y valores muy bajos en los ensayos 2 (10%), 8 (6.33%) y 11 (24%); contrariamente en el ensayo 9 se obtuvo 80% de rendimiento. Los rendimientos bajos se explican por la elevada concentración de NaOH dado que disminuyen la eficacia de la reacción de transesterificación (Castro *et al.*, 2007). En tanto el rendimiento alto (80%) es por el uso de concentración adecuada de KOH (0.5%) tal como lo recomienda Sevilla (2007) en

un rango de 0.3% a 1% al igual que Castillo (2007) con un rango de 0.5% a 1% de KOH. La viscosidad cinemática, en todos los ensayos donde se obtuvo biodiesel están dentro de los límites permitidos según Norma ASTM D 445 ($1.9 - 6.0 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$), a excepción del ensayo 5; los límites de viscosidad cinemática son impuestos para prevenir que el combustible cause recubrimientos en la bomba de inyección. En tanto el índice de cetano, indica la facilidad de inflamación del combustible en un motor, cuanto mayor el índice de cetano, más eficiente es el combustible (Sevilla, 2007). La Norma ASTM D 613 ha establecido el mínimo en 47 (ITDG y UNALM, 2005) criterio que se cumplen en todos los ensayos donde se obtuvieron biodiesel (a excepción del ensayo 7). Se obtuvo un modelo cuadrático cuyos estadísticos fueron adecuados (R^2 :96.53%; R^2_{ajustado} : 92.06 y $p < 0.05$).

$$Y = 59.32 - 24.19X_1 + 8.91X_2 - 8.46X_3 - 7.47X_1^2 - 6.82X_2^2 - 8.54X_1X_2 - 7.79X_1X_3 - 7.29X_2X_3$$

Donde Y: Rendimiento (%), X_1 : NaOH (%), X_2 : KOH (%), y X_3 : tiempo (min).

Tabla 4

Rendimiento, viscosidad cinemática e índice de cetano del biodiesel para el DCCR.

Ensayo	NaOH (%)	KOH (%)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Viscosidad cinemática ($\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$)	Índice de cetano
1	0.2	0.2	66.2	72.00	2.378	47.649
2	0.8	0.2	66.2	10.00	2.303	51.831
3	0.2	0.8	66.2	73.33	2.136	54.352
4	0.8	0.8	66.2	68.67	3.675	57.624
5	0.2	0.2	113.8	70.00	6.139	55.459
6	0.8	0.2	113.8	NHR	ND	ND
7	0.2	0.8	113.8	65.33	5.968	45.567
8	0.8	0.8	113.8	6.33	2.358	49.751
9	0.0	0.5	90.0	80.00	2.303	52.054
10	1.0	0.5	90.0	NHR	ND	ND
11	0.5	0.0	90.0	24.00	2.098	55.059
12	0.5	1.0	90.0	59.67	3.862	54.840
13	0.5	0.5	50.0	76.33	2.098	57.573
14	0.5	0.5	130.0	56.67	2.262	56.836
15	0.5	0.5	90.0	64.33	5.699	55.866
16	0.5	0.5	90.0	53.00	2.136	53.773
17	0.5	0.5	90.0	60.00	5.394	52.734

NHR: No hubo reacción; ND: No determinado por la no reacción.

Los análisis de desvíos relativos realizados para el modelo del rendimiento sugieren que el modelo es preciso cuando la concentración de NaOH y KOH están entre 0 y 0.5% en ambos casos y para tiempos de 90 min. Contrariamente a esto tanto para la viscosidad e índice de cetano la construcción de un modelo resultó ser no significativo por lo que no se incluye en este análisis. Al respecto Nazario (2005) la viscosidad cinemática como el índice de cetano del biodiesel no depende del proceso de producción sino del aceite de origen lo que concuerda con lo estipulado por Ribeiro (2007), que además precisa que la viscosidad y el índice de cetano del biodiesel aumentan con el tamaño de la cadena carbónica; así como del nivel de instauración del aceite de origen y el que proviene de un aceite insaturado tiene un valor medio (Castro *et al.*, 2007).

Análisis de superficie de respuesta

La Figura 03 muestra las curvas de contorno que permitieron definir las condiciones que maximizan el rendimiento de biodiesel. Así, en (a) esto se obtiene a concentraciones de NaOH que oscilan entre 0 y 0.2% y KOH entre 0.4 y 0.6%, en (b) se obtiene a concentraciones de NaOH entre 0 y 0.2% y con tiempos entre 120 y 130 minutos, en tanto en (c) se obtiene a concentraciones de KOH entre 0.5 y 1.0% y a tiempos de 60 y 90 minutos. En

relación al comportamiento de los catalizadores Ribeiro (2007), indica que la utilización de la potasa (KOH) como catalizador para biodiesel es más eficaz ya que es más soluble que la soda (NaOH) necesiéndose menor tiempo de conversión.

El análisis por superficie de respuesta permitió determinar las condiciones que optimizan (maximizan) el rendimiento de biodiesel siendo estas; NaOH entre 0 y 0.2%, KOH entre 0.4 y 0.6 % y con tiempos que van de 77 a 81 minutos con los que se logra en promedio 77.8% de rendimiento según el modelo establecido resultado que concuerda con Nazario (2005), que obtuvo un rendimiento de 77.86% usando KOH para la metanolisis a 60°C y 75 minutos. Para verificar la validez de los rangos de las condiciones que optimizan el rendimiento se llevó a cabo la comprobación experimental, con tres ensayos (Tabla 5). Se observa que los desvíos relativos son bajos llegando a ser del orden del 10% como máximo, que se presenta cuando la concentración de NaOH es de 0.2%. En la medida que el NaOH no tiene participación, el desvío relativo no supera el 4%. Esto corrobora el buen ajuste del modelo encontrado. Además es interesante notar que no existe ningún efecto sinérgico entre NaOH y KOH, más bien resultan ser antagónicos.

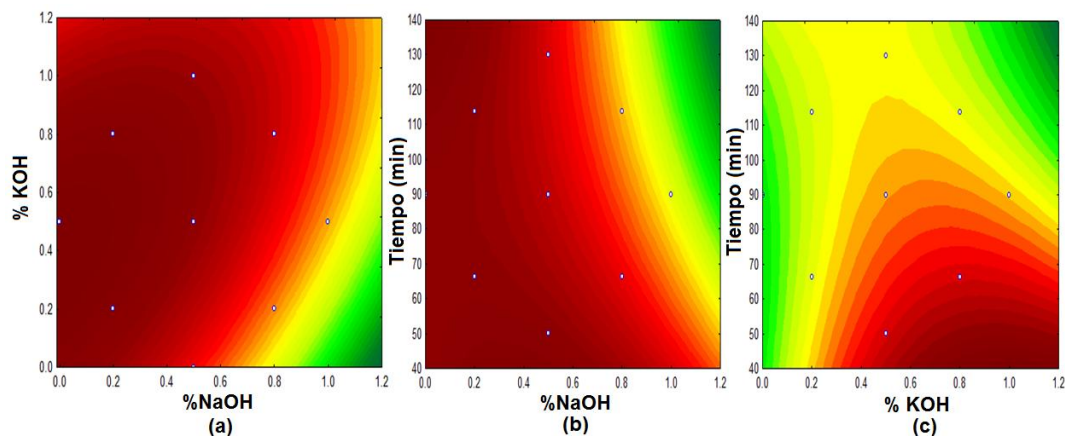


Figura 3. Curvas de contorno para el rendimiento: a) % NaOH versus % KOH, b) % NaOH versus tiempo y c) % KOH versus tiempo.

Tabla 5

Comprobación experimental de rendimiento experimental y previsto por el modelo en condiciones optimizadas.

Ensayos	NaOH (%)	KOH (%)	Tiempo (min.)	Rendimiento experimental	Rendimiento previsto	Desvío relativo (%)
1	0	0.6	77	80.33	77.55	3.47
2	0.2	0.4	81	68.66	75.38	9.78
3	0.1	0.5	79	77.33	76.04	1.67

Esto descartaría una posible mezcla de estas dos sustancias catalizadoras para el proceso de transesterificación, excepto cuando la concentración está a 0.1% (aquí se presenta un desvío relativo muy bajo).

3.3. Caracterización del biodiesel obtenido a condiciones optimizadas

La Tabla 6 presenta las características fisicoquímicas del biodiesel obtenido a condiciones optimizadas. Estos resultados están dentro del rango estipulado tanto por la norma americana ASTM D6751-07, como por la norma europea EN14214. El punto de inflamación del biodiesel obtenidos en este trabajo (174°C) está dentro de lo establecido según la Norma de la ASTM D93 que exige un mínimo de 130 °C para biocombustibles, este parámetro está relacionado con el contenido de metanol cuya presencia hace que éste disminuya involucrado en la seguridad de su almacenaje y manipulación (Sevilla, 2007). El índice de cetano es un parámetro relacionado con el retardo de ignición, cuanto mayor es el índice de cetano menor es el retardo de ignición y más eficiente es el combustible (Sevilla, 2007), mejorando el arranque en frío, consecuentemente la durabilidad del motor, disminuyendo el humo blanco del arranque y el nivel de ruido del motor. Este parámetro está en función de los grados API y la temperatura de destilación en recuperación. Cuanto más elevados sean estos parámetros, aumentará el índice de cetano (Ribeiro, 2007). Además Castro *et al.* (2007) manifiestan que aceites altamente saturados tendrán un índice de cetano alto (70 a más), en cambio aceites poliinsaturados como el de esta investigación tendrán un menor índice de cetano de alrededor de 47 como mínimo.

El diesel tiene un punto en la curva de destilación de (282° C), determinada por los diferentes hidrocarburos que lo contienen. Por eso se establecen porcentajes de destilado recuperado a diferentes temperaturas. El biodiesel tiene prácticamente un punto de destilación (293°C) que se ubica en el rango más alto de la curva del diesel. Este parámetro se incorpora para controlar que el combustible no haya sido contaminado con materiales de mayor punto de evaporación (Castro *et al.*, 2007). Estos mismos autores, refieren que algunos motores la requieren una viscosidad mínima para evitar pérdidas durante la inyección del combustible y la viscosidad máxima depende del diseño del sistema de inyección, agregan que un combustible muy viscoso puede causar una mala atomización, que lleva a mala combustión y formación de depósitos. La alta viscosidad también puede facilitar la contaminación del combustible con el aceite lubricante; sin embargo con 5.01 mm²/s obtenido para el biodiesel se evita los problemas indicados. Del mismo modo podemos decir que no existen riesgos de corrosión del sistema de alimentación del motor y desarrollo de microorganismos, como también problemas de taponamiento de filtros e inyectores gracias a su bajo índice de acidez y contenido de agua y sedimentos así como el de cenizas que está asociado a la cantidad de catalizador residual presente en el biodiesel.

El porcentaje de carbón conradson es uno de los más importantes indicadores de la calidad del biodiesel, correspondiendo estrictamente al contenido de glicéridos, ácidos grasos libres, jabones, catalizador remanente y otras impurezas.

Tabla 7

Características fisicoquímicas del biodiesel obtenido a condiciones optimizadas.

Característica	Unidades	Valor	ASTM D6751 – 07	EN 14214
VOLATILIDAD				
Punto de inflamación	°C	174.0	130 mínimo	--
Gravedad API (15,5°C)		39.46	--	--
DESTILACIÓN				
50% de recuperación	°C	275	300	--
90% de recuperación	°C	293	360 máximo	--
Punto final ebullición	°C		360	--
Recuperado	% vol	96.20	--	--
Residuo	% vol	3.50	--	--
Pérdida	% vol	0.30	--	--
FLUIDEZ				
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	5.01	1.9 – 6.0	3.5 – 5.0
Densidad a 15°C	g/ml	0.914	0.860 – 0.90	--
CONTAMINANTES				
Agua y sedimentos	% vol	<0.04	0.05 máximo	0.05 máximo
COMPOSICIÓN				
Índice de cetano		57.57	47 mínimo	--
Cenizas	% peso	<0.01	--	--
Residuo de carbón	% peso	<0.05	0.05 máximo	< 0.1
Índice de acidez	mg KOH/g	0.357	0.50 máximo	0.50 máximo
Glicerina libre	% peso	0.013	0.02 máximo	0.02 máximo
Glicerina total	% peso	0.207	0.24 máximo	0.25 máximo

El porcentaje de carbón conradson da una medida de la tendencia del combustible a depositar carbón en el sistema de inyección, pistón y válvulas (Nazario, 2005). Para el diesel convencional se mide en el 10% del residuo de destilación, sin embargo como el biodiesel se evapora aproximadamente a la misma temperatura, es difícil obtener este residuo de destilación, y por lo tanto el residuo de carbón se determina en toda la muestra (Castro *et al.*, 2007). Por otro lado, se encontraron niveles bajos de glicerina libre y total en el biodiesel que no superaron los valores establecidos por las normas. Un contenido alto de glicerina total y libre puede llegar a depósitos en el tanque de almacenamiento, sistema de combustible y motor. Además, causaría taponamiento de filtros y otros problemas de performance (Castro *et al.*, 2007). La glicerina libre indica presencia de glicerol residual en el biodiesel, debido a deficiencia en su lavado o purificación. La glicerina total indica presencia de glicerol residual y de mono, di y triglicéridos, debido a una

transesterificación incompleta (Sevilla, 2007). Además de las características de la tabla 7 se determinó el poder calórico que presento un valor de 36.37 MJ/kg, este valor indica la cantidad de energía del biodiesel, sin embargo es menor que el diesel pero que se compensa con el mayor índice de cetano (Ribeiro, 2007).

4. Conclusiones

Se optimizó el rendimiento de biodiesel obtenido de aceite de colza silvestre utilizando la metodología de superficie de respuesta, determinándose en la etapa de screening que las concentraciones de NaOH y KOH, y el tiempo de transesterificación presentan efecto significativo, no siendo el caso de la relación molar metanol/aceite y la temperatura. Las condiciones que maximizan el rendimiento de biodiesel (77.8%) fueron: concentración de NaOH entre 0 y 0.2%, de KOH entre 0.4 y 0.6%, tiempo de transesterificación entre 77 y 81 minutos, manteniendo la relación metanol/aceite en 6/1 y la temperatura a

60°C. Las propiedades fisicoquímicas de biodiesel obtenido a condiciones optimizadas están dentro de las especificaciones de la norma americana ASTM D6751 – 07 y europea EN14214.

Referencias bibliográficas

- Araujo, G. 2006. Obtención y Caracterización Físico - química de Biodiesel de Canola (*Brassica napus*). Departamento de Química. Programa de Post - Grado en Química. Brasil. Disponible en: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/defesageuzacompleto.pdf>
- Avelar, C. 2008. Estudio de evaluación y diseño para la implementación de un laboratorio de calidad especializado en biodiesel. Trabajo de graduación para optar el grado de Ingeniero Químico. Universidad centroamericana José Simeón Cañas. El salvador.
- ASTM D93: 2006. Método de ensayo para punto de inflamación con el probador de copa cerrada Pensky_Martens.
- ASTM D445: 2006. Método de ensayo para determinar la viscosidad cinemática en líquidos opacos y transparentes.
- ASTM D664: 2006a. Método de ensayo para determinar el número de acidez de productos del petróleo por titulación potenciométrica.
- ASTM D874: 2006. Método de ensayo para determinar las cenizas sulfatadas de aceites lubricantes y aditivos.
- ASTM D2709-96: 2006. Método de ensayo para determinar agua y sedimentos en combustibles destilados medios por centrifugación.
- ASTM D4530: 2006e1. Método de ensayo para determinar el residuo de carbón (método micro).
- ASTM D6584: 2007. Método de ensayo para determinar el contenido de glicerina libre y total en biodiesel esteres metílicos B-100 por cromatografía de gases.
- ASTM D6751: 2007. Estándares americanos de calidad para Biodiesel B-100.
- Blangino, A.; Romano, S. 2004. Modelado y correlación de propiedades en biodiesel. Anales de la Asociación Física Argentina 16: 93 - 97.
- Calvo, M. 2008. Grasas comestibles y Ácidos grasos. Bioquímica de los Alimentos. Disponible en URL: <http://milksai.unizar.es/bioquimica/temas/lipidos/vegc omunes.html>
- Castillo, L. 2007. Transformación de Biodiesel. Universidad Agraria La Molina. Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/GVEP/Castill o.pdf>
- Castro, P; Coello, J.; Castillo, L. 2007. Opciones para la Producción y uso de Biodiésel en el Perú. Soluciones Prácticas ITDG. Disponible en: <http://www.solucionespracticas.org.pe/td/pdf/biodiesel.pdf>
- EN14214. Estándares de calidad europeos para Biodiesel B-100.
- Frangrui, M.A., Milford A.H. 1999. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70 1-5, USA
- Lawson, H. 1994. Aceites y grasas alimentarios - Tecnología, utilización y nutrición. Editorial Acribia. Zaragoza – España.
- Lima, A; Lima, A; Portela, F; Santos, D; Neto, W; Hernandez-Terrones, M.; Fabris, J. 2010. Parâmetros da reação de Transesterificação etílica com óleo de Milho para produção de biodiesel. Ecletica. Química 35(4): 101-106.
- Magalhães, U; Vasconcelos, A.; Bessa, E. 2009. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de coco babaçu com aquecimento por microondas. Ecletica. Química 34(4): 37 – 48.
- Nazario, M. 2005. Aprovechamiento de aceites vegetales de desecho generados por el Comedor Universitario de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para la elaboración de Biodiesel. Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología. Lima – Perú
- Norma Codex STAN 210-1999. Para Aceites Vegetales Especificados.
- NTP 209.005:1968. (Revisada el 2011). ACEITES Y GRASAS COMESTIBLES. Método para la determinación de la acidez libre. 1a. ed.
- NTP 209.008:1968. ACEITES Y GRASAS COMESTIBLES. Método de determinación del índice de yodo. Método Wijs.
- NTP 209.006:1968. (Revisada el 2011). ACEITES Y GRASAS COMESTIBLES. Método de determinación del índice de peróxido. 1a. ed.
- ITDG-Organización de cooperación técnica internacional soluciones prácticas, UNALM-Universidad Nacional Agraria La Molina. 2005. Encuentro Científico Internacional. Disponible en: <http://www.solucionespracticas.org.pe/td/pdf/biodiesel.pdf>
- Ribeiro, W. 2007. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y El Caribe – CEPAL .Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, el Salvador, Guatemala y Honduras. Convenio CEPAL – Republica Federal Alemana. Disponible en: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>
- Sevilla, S. 2007. Consideraciones de calidad en el biodiesel. Laboratorio de energías renovables. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima Perú.
- Suarez, P; Santos, A; Rodríguez, J.; Alves, M. 2009. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. Quim. Nova 32(3): 768-775.
- Villarraga, A. 2007. Oportunidades de negocio para las empresas de biodiesel a partir de aceite de palma. Bucaramanga –Colombia. Disponible en: <http://gidetechma.upbbga.edu.co/files/paperdgi.pdf>